

тигается анализом двойственных оценок линейного программирования [2]. Для рассмотренного примера (рисунок, а) дефицит мощности распределяется в узлы 1, 2, 3 и их двойственные оценки, также как и связей 2-4, 3-4 равны единице. При использовании локального принципа РДМ определение узлов, в которые распределился дефицит мощности, осуществляется анализом полученного решения, в примере дефицитными являются только узлы 2 и 3, перегруженными, связи 2-4 и 3-4 (рисунок, б).

Таким образом, предложены принципы РДМ и алгоритмы их реализации при управлении развитием ЕЭС России. Показано, что принцип распределения дефицита мощности (коллективный или локальный) в значительной степени влияет на обоснование величины оперативного резерва мощности и требований к пропускной способности связей в ЭЭС.

1.Дьяков А.Ф. Проблемы надежности и безопасности энергоснабжения в условиях либерализации и дерегулирования в электроэнергетике // Энергетик. – 2005. – №8. – С.2-9.

2.Юдин Д.Б., Гольштейн Е.Г. Линейное программирование. – М.: Мир, 1966. – 276 с.

3.Чукреев Ю.Я. Модели обеспечения надежности электроэнергетических систем. – Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 1995. –176 с.

4.Дубровина И.В., Лялик Г.Н., Шлимович В.Д. Экспресс-метод оптимизации аварийного резерва мощности в сложных энергообъединениях // Электричество. – 1984. – № 7. – С.1-6.

5.Маркович И.М. Режимы энергетических систем. – М.: Энергия, 1969. – 351 с.

Получено 07.11.2011

УДК 621.311.001.57

В.А.СТЕННИКОВ, д-р техн. наук, Е.А.БАРАХТЕНКО, канд. техн. наук,
Д.В.СОКОЛОВ

*Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г.Иркутск
(Российская Федерация)*

МЕТОД МНОГОКОНТУРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ И ЕГО ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Излагается описание программного комплекса нового поколения для схемно-параметрической оптимизации многоконтурных теплоснабжающих систем (ТСС).

Викладається опис програмного комплексу нового покоління для схемно-параметричної оптимізації багатоконтурних теплопостачальних систем (ТПС).

The software of new generation for solving parameter optimization problems of heat supply systems is presented.

Ключевые слова: трубопроводные сети, теплоснабжающая система, методы оптимизации, динамическое программирование, многоконтурная оптимизация.

Проектирование теплоснабжающих систем (ТСС) предполагает решение множества задач, среди которых особое значение имеет задача схемно-параметрической оптимизации (определение параметров теплопроводов и насосных станций тепловой сети) [1].

В настоящей статье рассматривается задача схемно-параметрической оптимизации, в которой схема тепловой сети и места расположения источников теплоты являются заданными [2]. Данная задача, с одной стороны, имеет относительно самостоятельное значение, а с другой – взаимосвязана с другими задачами. В проектной практике возникают задачи оптимизации параметров как разветвленных, так и многоконтурных (кольцевых) тепловых сетей. В ИСЭМ (СЭИ) СО РАН разработаны и развиваются эффективные методы решения данных задач для обоих типов систем: для оптимизации разветвлённых сетей разработан метод, основанный на идеях динамического программирования (ДП) [1, 2]; для многоконтурных тепловых сетей разработан метод многоконтурной оптимизации (МКО) [2]. Эти разработки являются обобщением и реализацией накопленного опыта проектирования, реконструкции и развития реальных ТСС. Разработанные на базе данных методов вычислительные алгоритмы реализованы в программном комплексе (ПК) СОСНА (Синтез Оптимальных Систем с учетом НАдежности). Он предназначен для определения оптимальных параметров как вновь проектируемых, так и развиваемых многоконтурных ТСС сложной структуры с несколькими источниками при пересеченном рельефе местности. Разработка программного комплекса нового поколения для оптимизации параметров ТСС обусловлена необходимостью разработки и перехода к расширяемой архитектуре программных систем, которая позволит гибко организовывать итерационные процедуры в требуемой последовательности из различных вычислительных модулей, а также обеспечит широкие возможности добавления, замены или исключения отдельных процедур в существующей вычислительной схеме без значительной переработки имеющегося программного кода.

Изложенные выше положения учтены при разработке нового ПК СОСНА-М. Этот комплекс построен на современной методической основе, реализует быстродействующий алгоритм многоконтурной оптимизации ТСС и ориентирован на базовые принципы расширяемой архитектуры ПК.

Задача схемно-параметрической оптимизации ТСС. Формализованная постановка задачи оптимизации параметров ТСС достаточно традиционна, она максимально учитывает существующую часть ТСС, возможность ее реконструкции, перспективы развития системы и включает решение следующих подзадач [2]:

- определение перегруженных участков существующей части сети и выбор способов их реконструкции;
- расчет диаметров реконструируемых и новых участков с учетом их избыточности для выполнения требований надежности;
- выбор параметров и мест расположения насосных станций;
- оценка работоспособности полученного по системе решения.

Математическая формулировка задачи оптимизации параметров разветвленных и многоконтурных сетей предполагает, что заданными являются: схема сети из m узлов и n участков, представляемая в виде графа (J, I) , с указанием существующих и проектируемых участков (ветвей) и их длин; нагрузки в узлах сети; стандартный набор диаметров труб $(d_i \in D)$, допускаемых к прокладке; множество типов и параметров насосных станции (T) , которые могут устанавливаться в системе; способы реконструкции тепловой сети; допустимые давления в узлах и удельные потери давления на ее участках (h_i) и другие физико-технические и логические условия.

Необходимо найти такое решение, которое обеспечит минимум общих расчетных затрат по всей системе, т.е. требуется минимизировать функцию

$$F(D, H, P) = \sum_{i \in I} (g_i(d_i) + z_i(x_i, h_i) + \psi_i(x_i, H_i)) + \sum_{j \in J_1} z_j(P_j, Q_j),$$

где g_i, z_i, ψ_i, z_j – затраты соответственно на прокладку участков, электроэнергию, расходуемую на перекачку теплоносителя по участкам сети, сооружение насосных станций и энергию, доставляемую потребителям; H_i, x_i – действующий напор и расход среды на ветви i ; Q_j, P_j – расход теплоносителя и его давление в узле j .

При решении задачи должны выполняться балансовые условия, выражаемые в виде системы уравнений, связывающих вектор \bar{P} фазовых переменных с допустимыми значениями управлений:

$$Ax = Q, \quad \bar{A}^T \bar{P} = h(d) - H = y,$$

где \bar{A}, A – полная $m \times n$ матрица инцидентий и матрица $(m-1) \times n$ инцидентий линейно-независимых узлов и ветвей расчетной схемы; y – вектор потерь давлений на ветвях.

На переменные P_j налагаются ограничения в виде неравенств, которые могут иметь различную природу – от необходимости учёта рельефа местности до физико-технических ограничений на вскипание теплоносителя и механическую прочность используемых трубопроводов и

оборудования:

$$\underline{P}_j \leq P_j \leq \overline{P}_j, j \in J.$$

Должны соблюдаться ограничения на скорости w течения теплоносителя на участках подающих и обратных линий сети: $w_i \leq \overline{w}_i, i \in I$.

Логические выражения и соотношения типа

$$V_i(d_i) \in V(D), i \in I_1, d_1 \in D_i \subset D, \quad (1)$$

$$H_i \in T_i^{(\gamma)}, i \in I_3, \gamma = 1, 2 \quad (2)$$

отражают условия дискретности диаметров трубопроводов (1) и оборудования для насосных станций (2), а также конкретные требования к возможным способам реконструкции существующих участков тепловой сети по составу и параметрам насосных и дроссельных станций (как уже имеющихся, так и вновь сооружаемых).

Процесс поиска решения в задаче оптимизации параметров разветвленных сетей, основанный на применении метода динамического программирования, состоит из «прямого хода», когда рассчитываются условно-оптимальные траектории пьезометрического графика, из которых затем выбирается наилучшее по стоимости решение. Затем осуществляется процедура «обратного хода», во время которой восстанавливаются составляющие затрат на оптимизацию для найденного наилучшего варианта.

Выбор оптимальных параметров кольцевых ТСС осуществляется с помощью метода многоконтурной оптимизации, в основе которого лежит методический принцип последовательного улучшения решений [2], при этом в рассматриваемой задаче выделяют две подзадачи:

1) расчёт потокораспределения в сети (т.е. расходов на участках и давлений в узлах сети) при заданной ее схеме и фиксированных диаметрах участков трубопроводов;

2) оптимизация параметров (диаметров трубопроводов, давлений в узлах, мест расположения и параметров насосных станций) методом динамического программирования для рассчитанного потокораспределения.

Архитектура программного комплекса. Описанные выше модели и методы были положены в основу при разработке нового программного комплекса СОСНА-М. Принципы построения и схема реализации данного ПК базируются на применении компонентного подхода. Методические возможности данного подхода обеспечивают осуществление декомпозиции программного комплекса на отдельные составляющие

(компоненты¹) и их увязку в виде иерархической структуры, а также представление логической архитектуры ПК в виде взаимодействующих друг с другом компонентов. Все программные компоненты стандартизированы, т.е. реализуют определённые интерфейсы и соответствуют принятому в рамках системы способу передачи параметров и возвращения результатов.

Программный комплекс состоит из графической среды, предназначенной для работы с графическим представлением схемы ТСС на фоне городской застройки, информационной базой и прикладных программ для решения технико-экономических задач. Для организации вычислительных процедур программный комплекс использует информацию, поступающую из базы данных. После выполнения расчетов, полученные результаты сохраняются также в базу данных. Для графического формирования расчетной схемы ТСС на плане городской застройки и работы с параметрами отдельных элементов ТСС используется разработанная в ИСЭМ СО РАН информационно-вычислительная среда (ИВС) АНГАРА, которая сохраняет подготовленные для проведения расчетов данные в базу данных.

Основная часть компонентов ПК СОСНА-М реализована на языке программирования *Java*, что позволило решить задачу переносимости программного обеспечения между различными операционными системами. Вычислительные компоненты, требующие повышенного быстродействия от программных реализаций алгоритмов (такие, как решатели задач схемно-параметрической оптимизации и потокораспределения), разработаны с использованием языков программирования C++ и Fortran.

Другой особенностью предложенной архитектуры ПК СОСНА-М является управление работой и взаимодействием программных компонентов через онтологии – базы знаний специального типа, которые могут читаться и пониматься, отчуждаться от разработчика и физически разделяться их пользователями [3]. В программном комплексе применяются онтологии двух видов: онтология инженерных знаний и онтология программного обеспечения. Формализованное представление данных онтологий выполнено на разработанном языке описания предметной области, основанном на языке представления структурированной информации XML (Extensible Markup Language). Применение данного подхода позволяет управлять взаимодействием и работой программных

¹ Компонент – это повторно используемая часть программного обеспечения, реализующая определенное функциональное свойство программной системы.

компонентов в процессе проведения вычислений, изменяя только онтологию с описанием тепловой сети и программного обеспечения.

Развитие алгоритмов оптимизации параметров. В ПК СОСНА-М реализован новый вариант алгоритма для схемно-параметрической оптимизации ТСС, позволяющий эффективно рассчитывать разветвлённые и многоконтурные схемы с любым количеством элементов и сложной структурой. Предложенный алгоритм основан на методе поиска в глубину (DFS) [4]. Алгоритм, начав обход сети от источника, по матрице инцидентий, находит узлы (висячие или уже посещённые), от которых затем строятся траектории условно-оптимальных пьезометров. Затем в точке разветвления алгоритм «стыкует» различные их условно-оптимальные траектории.

Новый алгоритм, основанный на алгоритме поиска в глубину, в отличие от ранее применявшихся аналогов, обладает целым рядом преимуществ, в частности, он может работать с системами, имеющими множество подсистем или распадающимися на них в процессе компьютерного моделирования и расчетов. Новый алгоритм позволяет выбрать одну или несколько подсетей и рассчитывать оптимальные параметры для них. Это обеспечивает ему актуальную, особенно для крупных систем, возможность осуществления параллельных вычислений, когда одновременно рассчитываются несколько подсетей и наиболее полно используются возможности современных процессоров, а также существенно сокращается время счета.

Значительные трудности в организации итерационного вычислительного процесса представляет появление контуров замкнутой циркуляции. Нередко это приводит к останову расчетов и необходимости корректировки входных данных. Предложенный алгоритм успешно преодолевает такие ситуации. Он распознает контуры замкнутой циркуляции, самостоятельно их размыкает, корректно выполняет расчет сети и получает такое решение, которое устраняет контур замкнутой циркуляции.

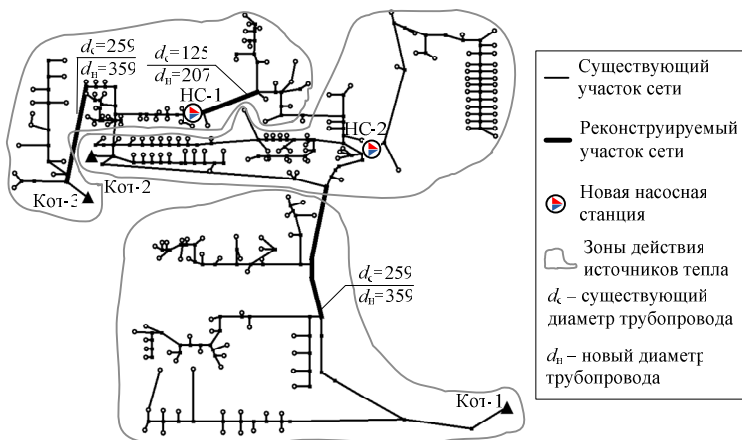
С целью корректного расчета сложных систем в настоящее время применяется многоуровневое иерархическое представление их топологической структуры. Наибольшее распространение этот подход получил при решении задач анализа потокораспределения в ТСС. Алгоритмы, применявшиеся при решении задач схемно-параметрической оптимизации, не позволяли проводить многоуровневые расчёты. Предложенный алгоритм схемно-параметрической оптимизации ТСС реализует многоуровневое моделирование, расчет и увязку решений, получаемых на разных уровнях.

Практическое применение ПК СОСНА-М для оптимизации ТСС. Данный ПК используется для исследовательских целей и применяется

для расчета реальных ТСС городов и населенных пунктов. На рис. 1 приведена принципиальная схема ТСС одного из населенных пунктов Иркутской области. В связи с ростом тепловых нагрузок возникла необходимость решения вопросов реконструкции и развития системы. С помощью разработанного ПК была проведена оптимизация параметров теплопроводов и насосных станций ТСС. На основе выполненных расчетов были определены:

- узкие места в системе с недостаточной пропускной способностью и значительными потерями давления теплоносителя;
- типы реконструкции перегруженных участков (перекладка теплопроводов существующих участков, прокладка нового теплопровода);
- оптимальные давления теплоносителя в подающей и обратной магистралях (в источниках, узлах соединения участков и потребителях);
- места расположения новых насосных станций и их параметры.

Основные решения по развитию ТСС показаны на рисунке. Новая насосная станция отмечена соответствующим условным обозначением, участки, требующие реконструкции в связи с недостаточной их пропускной способностью, выделены жирными линиями, определены типы их реконструкции и новые диаметры трубопроводов. Оптимальные зоны действия источников тепла по в результатам расчета также показаны на рисунке.



Укрупненная схема ТСС одного из населенных пунктов Иркутской области

Выводы

1. Проблема оптимальной реконструкции и развития ТСС представляется актуальной проблемой в связи с поставленной задачей мо-

дернизации экономики России. Появление современных математических методов и информационных технологий значительно расширяет возможности, повышает эффективность и обоснованность решения данных задач.

2. Задача схемно-параметрической оптимизации даже разветвленных ТСС, не говоря уже о многоконтурных, является сложной задачей невыпуклого программирования. Для ее решения дальнейшее развитие получили методы оптимизации и предложен новый алгоритм, реализация которого позволяет проводить расчеты ТСС любой сложности с любым множеством узлов, участков и контуров, учитывать иерархический характер построения систем, проводить параллельные расчеты нескольких подсистем.

3. Расширяемая архитектура программного комплекса обеспечивает организацию гибкой адаптивной модели управления вычислительным процессом, а представление его в виде программных компонентов придает ему универсальность и возможность многократного использования в различных программных реализациях при проектировании ТСС.

4. Применение разработанного программного комплекса СОСНА-М для принятия решений по управлению развитием ТСС повысит их эффективность и экономичность.

1. Стенников В.А., Сеннова Е.В., Ощепкова Т.Б. Методы комплексной оптимизации развития теплоснабжающих систем // Известия РАН. Энергетика. – 2006. – №3. – С.44-54.

2. Математическое моделирование и оптимизация систем тепло-, водо-, нефте- и газоснабжения / А.П. Меренков, Е.В. Сеннова, С.В. Сумароков, В.Г. Сидлер, Н.Н. Новицкий, В.А. Стенников, В.Р. Чупин. – Новосибирск: ВО «Наука», Сибирская изд. фирма, 1992. – 407 с.

3. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. – СПб.: Питер, 2000. – 384 с.

4. Левитин А. Алгоритмы: введение в разработку и анализ. – М.: Вильямс, 2006. – 576 с.

Получено 10.11.2011

УДК 628.153 : 628.17

Н.В. ФЕДОРОВ, А.М. ХРЕНОВ, кандидаты техн. наук

Харьковская национальная академия городского хозяйства

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОВМЕСТНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРЯМОЙ И ОБРАТНОЙ ТЕПЛОВОЙ СЕТИ С ПЕРЕТОКОМ

Рассматривается алгоритм решения задачи построения и расчета математической модели функционирования тепловой сети в случае, когда между напорной и обратной сетями существует непосредственная связь.

Розглядається алгоритм рішення задачі побудови і розрахунку математичної моделі функціонування теплової мережі у випадку, коли між напірною і зворотною мережами